

Упругие свойства изотропного графита

А. И. Коробов^{1,*}, В. М. Прохоров^{2,†}, А. И. Кокшайский^{1,‡}, Н. В. Ширгина^{1,§}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов,
Россия 142190, Москва, г. Троицк, улица Центральная, д. 7а

(Статья поступила 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В данной работе ультразвуковым методом исследованы линейные и нелинейные упругие свойства графита. Измерения проводились импульсным методом. В образцах изотропного конструкционного графита, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, измерены скорости сдвиговых и продольных объемных упругих волн (ОАВ). Измерения скорости ОАВ позволили определить все независимые компоненты тензора упругости второго порядка в графите. В этих образцах также был исследован акустоупругий эффект: экспериментально измерена зависимость скоростей ОАВ от величины одноосного сжатия, приложенного к образцу. По результатам этих измерений методом Терстона-Браггера определены все независимые компоненты тензора упругости третьего порядка в изотропном графите.

PACS: 43.25+у, 45.70.-п

УДК: 534.222

Ключевые слова: метод Терстона-Браггера, графит, упругие модули.

ВВЕДЕНИЕ

Графит находит применение при синтезе алмазов, получении композиционных материалов, в электротехнике, машиностроении, в ядерных реакторах. Однако его упругие свойства изучены недостаточно полно. Для количественной оценки упругих свойств твердых тел используются коэффициенты упругости второго порядка C_{ijkl} (КУВП) и коэффициенты упругости третьего порядка C_{ijklqr} (КУТП). КУВП характеризуют линейную зависимость напряжения от деформации твердого тела в законе Гука. Отклонения от линейной зависимости закона Гука определяется КУТП. КУТП количественно описывают ангармонические свойства кристаллической решетки: тепловое расширение, взаимодействие фононов, высокочастотное поглощение ультразвука. Эти коэффициенты позволяют рассчитать анизотропию параметра Грюнайзена. КУТП также используются для анализа взаимодействия акустических волн конечной амплитуды в твердых телах [1, 2]. Для исследования нелинейных упругих свойств разработан ряд экспериментальных методов, среди которых широко используются метод Терстона-Браггера [3] и спектральный метод [1].

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные образцы представляли собой прямоугольные параллелепипеды 3.98x2.98x5.98 мм.

Исследовались образцы четырех типов: R8500, R8510, R8650 и R8710 плотностью 1753, 1831, 1847 и 1860 кг/м³, соответственно. Исследуемые образцы произведены SGL CARBON GROUP, Германия и предоставлены ФГУП ТИСНУМ для исследований.

Для проведения экспериментальных измерений применялся ультразвуковой автоматизированный измерительный комплекс, в составе импульсного приемопередатчика RITEC RAM-5000 и система создания контролируемого давления на границе двух тел. Блок-схема установки приведена на рис. 1. Исследования проводились импульсным методом.

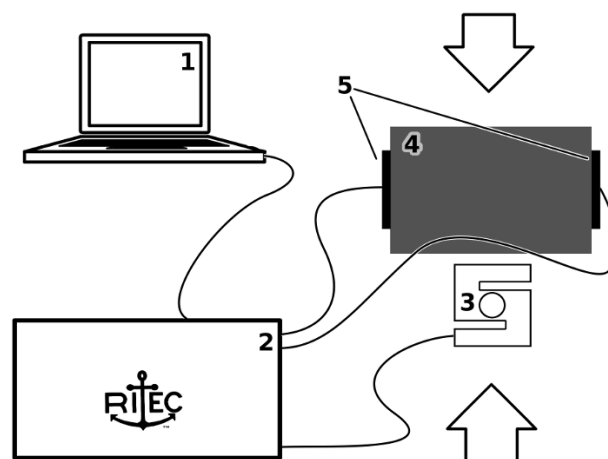


Рис. 1: Блок-схема установки: 1 — компьютер, 2 — ультразвуковой комплекс, 3 — датчик давления, 4 — образец (графит), 5 — пьезоэлектрические преобразователи

*E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

†E-mail: pvm@tisnum.ru

‡E-mail: super_trouper@mail.ru

§E-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru

Таблица I: результаты измерения скоростей продольной и сдвиговой ОАВ и рассчитанные по формулам (1) и (2) значения КУВП

Образец	Плотность, кг/м ³	V_L , м/с	V_T , м/с	C_{11} , Н/м ²	C_{44} , Н/м ²
R8500	1753	2630,5	1591	1.21×10^{10}	4.44×10^9
R8510	1831	2581	1597	1.22×10^{10}	4.67×10^9
R8650	1847	2753,5	1669	1.40×10^{10}	5.14×10^9
R8710	1860	2723,5	1657	1.38×10^{10}	5.11×10^9

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

КУВП определялись по результатам измерения скорости объемных акустических волн (ОАВ) в исследуемых образцах. При измерении скоростей ОАВ использовались стандартные пьезоэлектрические преобразователи, применяемые в неразрушающем контроле. Измерение скорости продольных ОАВ проводилось на частоте 10 МГц а сдвиговых ОАВ на частоте 5 МГц. Численные значения скоростей ОАВ в образце, измеренные вдоль трех направлений, параллельных ребрам образца, в пределах ошибок измерений, которые составляли 1,5%, совпали. Это позволило считать исследуемые образцы изотропными. В изотропных твердых телах имеется 12 отличных от нуля КУВП, но только 2 из них являются независимыми. Обычно такими принято считать коэффициенты C_{11} и C_{44} . В табл. 1 представлены результаты измерения скоростей продольной и сдвиговой ОАВ и рассчитанные по формулам (1) и (2) значения КУВП.

$$V_L = \sqrt{(C_{11}/\rho_0)}, \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{(C_{44}/\rho_0)}, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность образца, V_L — продольная скорость, V_T — сдвиговая скорость ОАВ.

Расчет КУТП производился по методу Терстона–Браггера [3], заключающемуся в решении системы уравнений по имеющимся экспериментальным данным:

$$\left[\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P} \right]_{P=0} = (2\rho_0 W^2 F + G) \quad (3)$$

где W — «естественная скорость» ОАВ, ρ_0 — плотность, $F = S_{jkab}^T M_a M_b U_j U_k$, $G = S_{ipab}^T C_{jrksp} U_j U_k N_r N_s M_a M_b$, S_{ipab}^T , S_{jrab}^T — коэффициенты податливости второго порядка, C_{jrksp} — КУТП в исследуемом материале, U_k — компоненты вектора поляризации U , N_r — компоненты волнового вектора N , M_i — компоненты единичного вектора M в направлении одноосного сжатия. В изотропном твердом теле имеется 18 отличных от нуля компонент тензора КУТП, но только три коэффициента:

C_{111} , C_{112} , C_{123} — считаются независимыми [4], а остальные являются их линейной комбинацией. Для определения трех независимых КУТП методом Терстона–Браггера в образцах графита были измерены зависимости относительного изменения скорости ($\Delta V/V$) продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия P при различных направлениях единичных векторов N , U и M . Результаты этих измерений для образца R8510 приведены на рис. 2.

На основе экспериментально измеренных величин и соотношений была получена система из четырех линейных уравнений для определения трех независимых КУТП в образцах. Эта система была решена на компьютере методом наименьших квадратов и определены все три независимые КУТП: C_{111} , C_{112} , C_{123} в образцах графита.

Характерной интересной особенностью исследуемых образцов графита является то, что все КУТП в нем имеют положительный знак. В то время как в исследованных ранее материалах — АМгб6, В95, Д16 [5–7] — хотя бы один из КУТП имел отрицательный знак. Полученные аномальные значения КУТП могут быть объяснены слоистой структурой доменов образцов графита, с чем связана и его особенность, заключающаяся в том, что коэффициент температурного расширения графита отрицателен в направлении базисных плоскостей [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально определены все независимые компоненты тензора упругости второго порядка в графите. В образцах графита исследован акустоупругий эффект: экспериментально измерена зависимость скоростей ОАВ от величины одноосного сжатия, приложенного к образцу. По результатам этих измерений методом Терстона–Браггера определены все независимые компоненты тензора упругости третьего порядка в изотропном графите. Полученные компоненты тензора упругости имеют положительный знак, что объясняется особенностями структуры образцов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

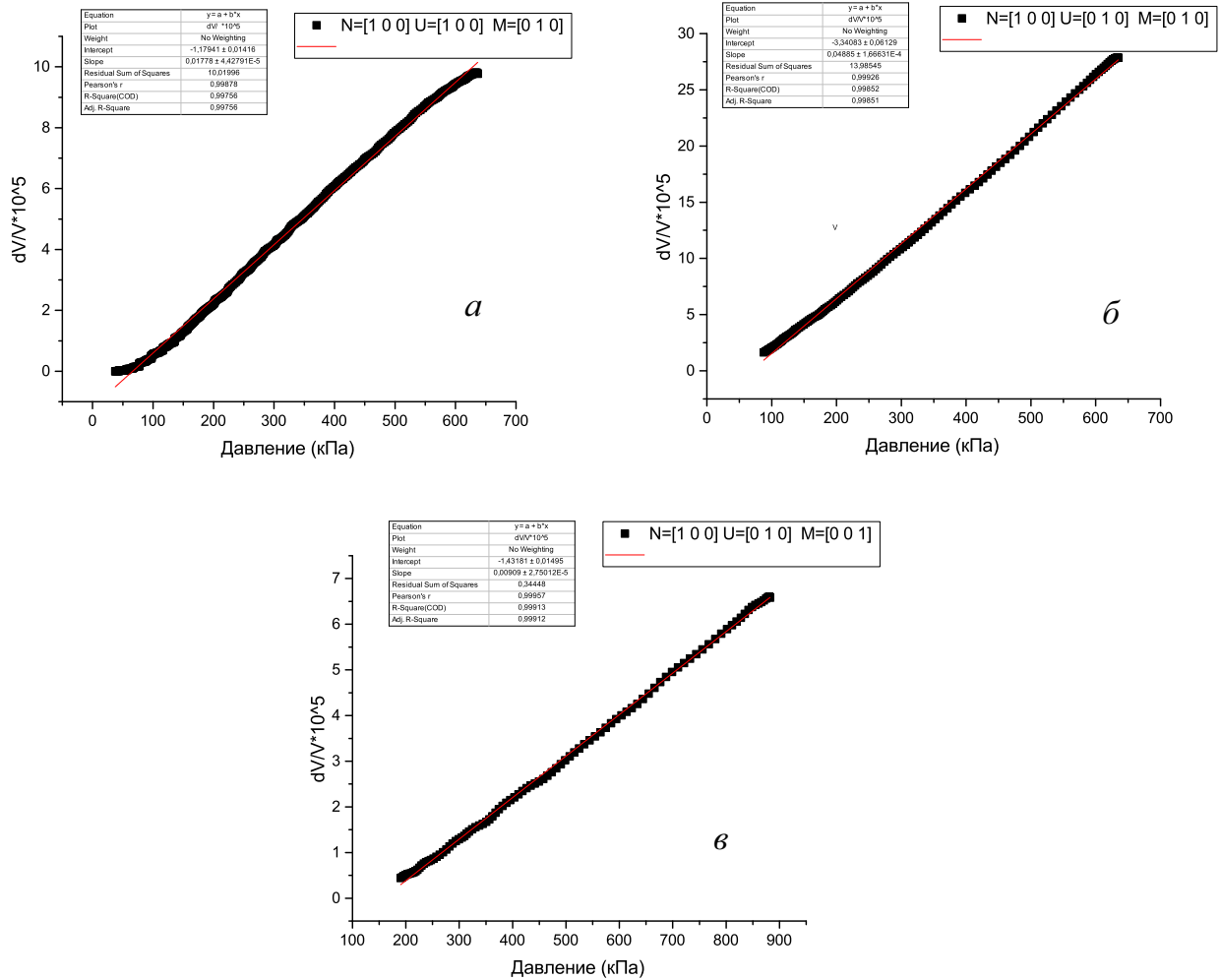


Рис. 2: Зависимости относительного изменения скоростей продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия образца P при различных направлениях единичных векторов N, U, M в образце графита R8510

Таблица II: Коэффициенты упругости третьего порядка в графите в 10^{11} Н/м²

	C_{111}	C_{112}	C_{123}
R8500	3.34 ± 0.77	1.43 ± 0.23	0.62 ± 0.35
R8510	$3.85 \pm 1, 46$	1.40 ± 0.40	0.40 ± 0.26
R8650	2.32 ± 2.12	0.98 ± 0.63	0.31 ± 0.28
R8710	1.86 ± 1.02	0.81 ± 0.30	0.22 ± 0.18

[1] Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
 [2] Руденко О. В. УФН. 2006. **176**, № 1. С. 77.
 [3] Thurston R. N., Brugger K. Phys. Rev. 1964. **133**. P. A1604.
 [4] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллоакустики. 1975.
 [5] Коробов А. И., Прохоров В. М., Мехедов Д. М. ФТТ. 2013. **55**, № 1. С. 10.

[6] Волков А. Д., Кокшайский А. И., Коробов А. И., Прохоров В. М. Акуст. журн. 2015. **61**, № 6. С. 685.
 [7] Коробов А. И., Кокшайский А. И., Прохоров В. М., Евдокимов И. А., Перфилов С. А., Волков А. Д. ФТТ. 2016. **58**, № 12. С. 2384.
 [8] Gauster W. B., Fritz I. J. J. Appl. Phys. 1974. **45**, № 8. P. 3309.

The elastic properties of isotropic graphite

A. I. Korobov^{1,a}, V. M. Prokhorov^{2,b}, A. I. Kokshayskiy^{1,c}, N. V. Shirgina^{1,d}

¹Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials. Moscow 142190, Troitsk, Russia

E-mail: ^aakor@acs465a.phys.msu.ru, ^bpvm@tisnum.ru, ^csuper_trouper@mail.ru, ^dnatalia.shirgina@physics.msu.ru

Shear and longitudinal velocities of bulk acoustical waves (BAW) were measured in the samples of isotropic graphite of a rectangular parallelepiped shape. BAW velocity measurements allowed to determine all independent components of the tensor of elasticity of the second order in graphite. In these samples was also investigated acoustoelasticity effect: the experimentally measured dependence of the magnitude of the BAW velocity while uniaxial compression applied to the sample. According to the results of these measurements were identified all independent components of the tensor of the third order elasticity in isotropic graphite by Thurston–Brugger method.

PACS: 43.25+у, 45.70.-н.

Keywords: Thurston–Brugger method, graphite, elasticity modules.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.
2. Прохоров Вячеслав Максимович — канд. физ.-мат. наук, 1-й зам. директора по научной работе; e-mail: pvm@tisnum.ru
3. Кокшайский Алексей Иванович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: super_trouper@mail.ru.
4. Ширгина Наталья Витальевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru.